

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
31 juillet 2003 (31.07.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/063180 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G21F 5/10

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR03/00184

(22) Date de dépôt international :
21 janvier 2003 (21.01.2003)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
0200805 23 janvier 2002 (23.01.2002) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : COM-
MISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE [FR/FR];
31-33, rue de la Fédération, F-75752 Paris 15ème (FR).

Michel [FR/FR]; 5 Rue Casimir Gouny, F-91620 La Ville
Au Bois (FR). DURET, Bernard [FR/FR]; 17 Impasse
du 16 Août 1944, F-38950 St. Martin le Vinoux (FR).
POULIN, Gérard [FR/FR]; c/o Brevatome, 3, rue du
Docteur Lancereaux, F-75008 Paris (FR).

(74) Mandataire : POULIN, Gérard; c/o BREVATOME, 3,
rue du Docteur Lancereaux, F-75008 PARIS (FR).

(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ,
DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK,
LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX,
MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG,
SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC,
VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(72) Inventeurs; et

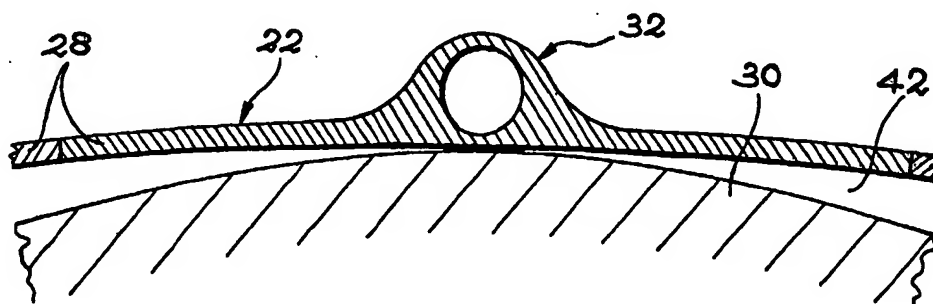
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : BADIE,

(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE,
LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: INSTALLATION FOR THE VERY LONG STORAGE OF PRODUCTS THAT EMIT A HIGH HEAT FLUX

(54) Titre : INSTALLATION D'ENTREPOSAGE DE TRES LONGUE DUREE DE PRODUITS EMETTANT UN FLUX THER-
MIQUE ELEVE



(57) Abstract: The invention relates to an installation for the very long storage of products that emit a high heat flux. The inventive installation comprises a container (14), in which the products to be stored are placed, and an evaporator (22) which surrounds the container in order to remove the heat by means of a heat pipe. The aforementioned evaporator (22) comprises a jacket (28), tubes (32), which are solidly connected to said jacket and which are filled with a heat transfer fluid, such as water, and a system for clamping the evaporator (22) to the container (14). According to the invention, the evaporator (22) is only in close contact with the container (14) opposite the tubes (32). Preferably, channels (42) are provided on either side of the tubes (32) in order to allow air circulation by means of natural convection between the evaporator (22) and the container (14).

(57) Abrégé : Installation comprend un conteneur (14), dans lequel sont placés les produits à entreposer, et un évaporateur (22) entourant le conteneur, pour évacuer la chaleur par un effet de caloduc. L'évaporateur (22) comporte une chemise (28), des tubes (32) solidaires de la chemise et remplis d'un fluide caloporteur tel que de l'eau, et un système de serrage de l'évaporateur (22) sur le conteneur (14). L'agencement est tel que l'évaporateur (22) n'est maintenu en contact étroit avec le conteneur (14) qu'en face des tubes (32). Avantageusement, des canaux (42) sont prévus pour la circulation de l'air par convection naturelle entre l'évaporateur (22) et le conteneur (14), de part et d'autre des tubes (32).

WO 03/063180 A2



eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Publiée :

- *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

INSTALLATION D'ENTREPOSAGE DE TRES LONGUE DUREE DE
PRODUITS EMETTANT UN FLUX THERMIQUE ELEVE

DESCRIPTION

5

Domaine technique

L'invention concerne une installation d'entreposage, c'est-à-dire de stockage sous surveillance et réversible, de très longue durée
10 (supérieure à 50 ans), de produits calorifiques émettant un flux thermique élevé.

Une telle installation d'entreposage peut notamment être utilisée pour le stockage de très longue durée de déchets nucléaires tels que des combustibles
15 nucléaires irradiés. En effet, l'entreposage de tels produits nécessite une maîtrise de la température des conteneurs dans lesquels ils se trouvent.

Etat de la technique

20 L'entreposage de très longue durée de produits calorifiques tels que des déchets nucléaires s'effectue généralement en conditionnant les déchets dans des conteneurs et en plaçant ces derniers dans des cavités formées dans le sol et délimitées par des parois de
25 béton.

Le flux thermique élevé qui est généré par les produits calorifiques doit être évacué par un système de refroidissement qui stabilise la température de surface des conteneurs. Cela permet d'assurer la
30 durabilité de la structure des conteneurs et des produits calorifiques qu'ils contiennent. Cela permet également d'assurer la pérennité du béton des parois

environnantes. Les systèmes de refroidissement sont, de préférence, passifs.

Dans le document FR-A-2 791 805, il est proposé une installation d'entreposage de très longue
5 durée de produits calorifiques. Dans cette installation, la puissance thermique est extraite au plus près de la barrière étanche matérialisée par le conteneur, sans intrusion et de manière passive, avant d'être évacuée à l'extérieur du site par un circuit
10 caloporteur non contaminable.

De façon plus précise, ce document propose d'enserrer étroitement chaque conteneur, sur toute sa surface cylindrique extérieure, par une chemise souple et démontable constituée, par exemple par une tôle
15 mince agrafée et serrée, qui entoure le conteneur de façon telle que les surfaces extérieures lisses du conteneur et de la chemise soient normalement en contact. L'application de la chemise sur la surface extérieure du conteneur est assurée par un serrage en
20 plusieurs points, lors de la fermeture (ou agrafage) de la chemise.

La chemise est équipée extérieurement, à intervalles réguliers (par exemple environ 20 cm), de tubes verticaux de section circulaire ou carrée. Ces
25 tubes sont intimement liés à la chemise, du point de vue conduction thermique, de façon à former un évaporateur pour le fluide de refroidissement. De préférence, ce fluide fonctionne en régime diphasique liquide-vapeur et constitue un caloduc avec le circuit
30 dans lequel il est confiné. Le condenseur du caloduc se trouve à l'extérieur du site, où un échange thermique

s'effectue avec l'air libre qui circule par convection naturelle.

Dans cette installation connue, la transmission du flux thermique en provenance du conteneur est assurée, d'une part, par le contact direct des parois du conteneur et de la tôle formant la chemise et, d'autre part, par le contact entre ladite tôle et les tubes qu'elle supporte.

Dans un autre mode de réalisation décrit dans le document FR-A-2 791 805, les tubes font corps avec des tronçons de chemise, eux mêmes assemblés bout à bout par soudage ou par tout autre moyen de liaison mécanique. Dans ce cas, le rendement thermique du système ne dépend que de la qualité du contact entre le conteneur et les tronçons de chemise juxtaposés.

Dans tous les cas, la qualité de la transmission thermique augmente lorsque la résistance de contact diminue, c'est-à-dire lorsque le contact entre les surfaces est plus étroit. En d'autres termes, une bonne transmission du flux thermique entre le conteneur et la chemise souple qui l'entoure suppose que l'épaisseur du film d'air résiduel entre les deux parois soit limitée à une fraction de millimètre.

Un appoint de refroidissement est normalement apporté par l'air environnant, en perpétuelle convection naturelle à la surface extérieure de la chemise du caloduc. Pour assurer le refroidissement en cas d'incident ou d'accident, des moyens de mise en mouvement de l'air en convection forcée peuvent être prévus. L'échange thermique augmente avec la surface extérieure de la chemise, lorsque celle-ci est réalisée en un matériau conducteur de la chaleur et lorsque la

résistance de contact entre le conteneur et la chemise est faible. En outre, dans un mode de réalisation préféré, il est proposé de munir les tubes d'ailettes de refroidissement pour augmenter la surface d'échange
5 entre la chemise et l'air environnant et autoriser, dans une éventuelle situation d'accident, des temps d'intervention plus longs.

Des modélisations, puis expérimentations effectuées à échelle 1, sur des conteneurs de 2 mètres
10 de diamètre, ont permis d'obtenir les performances annoncées dans le document FR-A-2 791 805.

La poursuite de ces travaux et leur orientation vers l'industrialisation ont mis en évidence la difficulté d'obtenir un jeu moyen inférieur
15 à 0,3 mm entre les conteneurs et la surface de la chemise. Une telle précision, réalisable sur un prototype, est difficile à obtenir à l'échelle industrielle avec des outils traditionnels et toute tentative pour le diminuer, par exemple à 0,1 mm,
20 augmente très fortement le coût de fabrication. Or, ce jeu moyen constitue le paramètre le plus important pour les performances de l'installation.

Exposé de l'invention

25 L'invention a précisément pour objet une installation d'entreposage de très longue durée de produits calorifiques, comparable à l'installation proposée dans le document FR-A-2 791 805 mais dont la conception originale autorise l'obtention de
30 performances au moins comparables de façon sensiblement plus simple et moins coûteuse, en utilisant des moyens industriels traditionnels.

Conformément à l'invention, il est proposé d'utiliser une installation d'entreposage de très longue durée de produits calorifiques, comportant au moins un conteneur de confinement desdits produits, un évaporateur comprenant une chemise entourant le conteneur et une pluralité de tubes solidaires de la chemise et remplis d'un fluide caloporteur, et des moyens de serrage de l'évaporateur sur le conteneur, caractérisé en ce que l'évaporateur présente une surface intérieure telle que les moyens de serrage maintiennent l'évaporateur en contact étroit avec une surface extérieure du conteneur seulement en face de chacun des tubes.

Des études et des modélisations d'une telle installation ainsi que des essais concernant certaines caractéristiques délicates telles que l'interface entre la chemise et le conteneur ont montré que la limitation des surfaces de contact entre le conteneur et la chemise à des zones restreintes situées en face des tubes permet d'obtenir, par des moyens industriels traditionnels et donc d'un coût raisonnable, un échange thermique entre le conteneur et les tubes aussi efficace que celui qui serait obtenu, dans l'installation de l'art antérieur illustrée par le document FR-A-2 791 805, en ménageant entre le conteneur et la chemise un jeu moyen constant d'environ 0,1 mm, très difficile à obtenir industriellement.

Avantageusement, la surface intérieure de l'évaporateur présente, entre les tubes, un rayon de courbure sensiblement supérieur à celui de la surface extérieure du conteneur.

De préférence, afin que la zone de contact entre le conteneur et chacun des tubes présente une surface bien définie et ne soit pas limitée à une ligne, notamment dans le cas de tubes de section
5 circulaire, la surface intérieure de l'évaporateur comporte, en face de chacun des tubes, une partie de forme complémentaire de la surface extérieure du conteneur, maintenue en contact surfacique étroit avec ladite surface extérieure par les moyens de serrage.

10 Selon un premier mode de réalisation de l'invention, les tubes sont fixés, de préférence par soudage, à l'intérieur d'une structure continue, de section sensiblement circulaire, formant la chemise. Dans ce cas, les tubes peuvent comporter des ailettes
15 de refroidissement, situées entre la chemise et le conteneur.

Selon un deuxième mode de réalisation de l'invention, chaque tube est réalisé d'un seul tenant avec deux tronçons de chemise et les tronçons des tubes
20 voisins sont assemblés entre eux bord à bord pour former la chemise. Les tronçons des tubes voisins peuvent alors être assemblés soit par soudage, soit par des moyens de liaison mécaniques quelconques.

Les tubes peuvent avoir soit une section
25 sensiblement carrée ou rectangulaire, soit une section sensiblement circulaire. Dans ce dernier cas, les tubes présentent avantageusement des talons dont une face intérieure est maintenue en appui surfacique étroit contre la surface extérieure du conteneur par les
30 moyens de serrage.

De façon facultative, une surface extérieure de l'évaporateur peut comporter des ailettes de refroidissement.

Enfin, selon un perfectionnement particulièrement avantageux de l'invention, en dehors de zones situées en face des tubes, l'évaporateur est éloigné du conteneur de façon à délimiter des canaux verticaux de circulation d'air, par convection naturelle. Dans une variante de réalisation de l'invention, les canaux font alors partie d'un circuit fermé qui constitue une barrière de confinement supplémentaire.

Brève description des dessins

On décrira à présent, à titre d'exemples illustratifs et nullement limitatifs, différents modes de réalisation de l'invention, en se référant aux dessins annexés, dans lesquels :

-la figure 1 est une vue en coupe verticale qui représente très schématiquement une partie d'une installation d'entreposage de produits calorifiques conforme à l'invention ;

-la figure 2 est vue en coupe, selon un plan horizontal, illustrant schématiquement une partie d'un évaporateur selon l'invention, en contact quasi linéique avec un conteneur entreposé dans l'installation ;

-la figure 3 est une vue comparable à la figure 2, illustrant schématiquement le cas d'un évaporateur en contact surfacique avec un conteneur contenant des produits calorifiques ;

-la figure 4 est une vue en coupe comparable aux figures 2 et 3, représentant plus en détail un évaporateur selon un premier mode de réalisation de l'invention, et les moyens de serrage associés ;

5 -la figure 5 est une vue en coupe comparable à la figure 4, illustrant côte à côte trois variantes de section possibles pour les tubes de l'évaporateur ainsi que la présence facultative d'ailettes de refroidissement sur la chemise ;

10 -la figure 6 est une vue en coupe comparable aux figures 4 et 5, illustrant une autre variante du premier mode de réalisation de l'invention ;

 -la figure 7 est une vue en coupe comparable aux figures 4 à 6, illustrant cote à cote trois
15 variantes d'un deuxième mode de réalisation de l'invention ;

 -la figure 8 représente trois courbes illustrant l'évolution de la température moyenne (en °C) dans l'épaisseur d'un conteneur contenant un
20 produit calorifique, en fonction du jeu moyen (en mm) entre l'évaporateur et le conteneur, respectivement dans le cas d'un jeu constant (courbe A), dans le cas d'un contact entre les tubes (courbe B) et dans le cas d'un contact en face des tubes conformément à
25 l'invention (courbe C) ;

 -la figure 9 représente la répartition du flux thermique (en W/m^2) en fonction de la distance (en mm) à l'axe d'un tube, dans le sens de la circonférence du conteneur, respectivement dans le cas d'un jeu constant
30 de 0,01 mm (courbe D), dans le cas d'un jeu constant de 0,3 mm (courbe E) et dans le cas d'un contact en face des tubes et d'un jeu moyen de 0,3 mm (courbe F) ; et

-la figure 10 représente l'évolution de la température maximale du conteneur (en°C) en fonction de l'effort de serrage appliqué sur l'évaporateur (en Newton).

5

Description détaillée de modes de réalisation préférés de l'invention

Sur la figure 1, on a représenté schématiquement une partie d'une installation conforme à l'invention, destinée à l'entreposage de très longue durée de produits calorifiques tels que des déchets nucléaires constitués, par exemple, par des combustibles nucléaires irradiés.

Dans sa configuration générale, cette installation est comparable à celle qui est décrite dans le document FR-A-2 791 805. Pour de plus amples détails, on se reportera donc utilement à ce document.

Pour la bonne compréhension de l'invention, on rappellera simplement ici que l'installation comprend une cavité fermée 10, délimitée latéralement et vers le bas par des parois de béton 12. La cavité 10 est dimensionnée de façon à pouvoir loger un ou plusieurs conteneurs 14 dans lesquels sont conditionnés les déchets nucléaires que l'on désire entreposer. Les conteneurs 14 ont la forme de fûts cylindriques et ils sont placés dans la cavité 10 avec leurs axes orientés sensiblement verticalement. Un espace 16 est ménagé entre chaque conteneur 14 et les parois 12 de la cavité 10 pour permettre la circulation de l'air environnant, par convection naturelle. A cet effet, le conteneur 14 repose sur le fond de la cavité 10 par l'intermédiaire d'un piédestal 17.

La cavité 10 est fermée vers le haut par une dalle de béton 18, comportant un bouchon amovible 20 au-dessus de chacun des conteneurs 14.

Pour assurer l'évacuation de la chaleur émise
5 par les déchets nucléaires conditionnés dans les conteneurs 14, de façon passive c'est-à-dire sans apport d'énergie extérieure, un caloduc est associé à chaque conteneur. Plus précisément, ce caloduc comprend un évaporateur 22 qui entoure le conteneur 14, un
10 aérocondenseur 24 placé au-dessus de la dalle 18 et deux canalisations 26 reliant l'évaporateur 22 à l'aérocondenseur 24 au travers du bouchon 20. L'aérocondenseur 24 peut être commun à plusieurs conteneurs 14.

15 Un fluide caloporteur tel que de l'eau à 100 °C est placé dans le caloduc. Les changements de phase de ce fluide (évaporation/condensation) dans le caloduc assurent le transfert de la chaleur émise par les déchets nucléaires de la source chaude constituée
20 par le conteneur 14 vers la source froide constituée par l'aérocondenseur 24.

Comme l'illustre schématiquement la figure 2, l'évaporateur 22 comprend une chemise 28, qui entoure sensiblement en totalité la surface périphérique
25 extérieure 30 du conteneur 14, et une pluralité de tubes 32 solidaires de la chemise 28. Les tubes 32 sont parallèles les uns aux autres ainsi qu'à l'axe sensiblement vertical du conteneur et ils sont régulièrement répartis sensiblement à égale distance
30 les uns des autres, sur toute la périphérie du conteneur.

En se reportant à nouveau à la figure 1, on voit que les tubes 32 sont reliés à un distributeur annulaire d'eau liquide 34 à leurs extrémités inférieures et dans un collecteur annulaire d'eau vaporisée 36 à leurs extrémités supérieures. Le distributeur 34 et le collecteur 36 sont reliés séparément à l'aérocondenseur 24 par l'une des canalisations 26 et celles-ci comportent, en dessous du bouchon 20, des raccords démontables 38. Les tubes 32 ainsi que les collecteurs 34 et 36 sont remplis du fluide caloporteur contenu dans le caloduc.

L'évaporateur 22 est monté sur le conteneur 14, de façon démontable, par des moyens de serrage 40 dont un exemple de réalisation sera décrit ultérieurement en référence à la figure 4.

Conformément à l'invention et comme l'illustre schématiquement la figure 2, la surface intérieure de l'évaporateur 22, c'est-à-dire la surface de l'évaporateur tournée vers le conteneur 14, est réalisée de façon telle que les moyens de serrage 40 maintiennent l'évaporateur 22 en contact étroit avec la surface extérieure 30 du conteneur 14 uniquement en face de chacun des tubes 32. Ainsi, les parties de la chemise 28 qui sont placées entre les tubes 32 sont écartées de la surface extérieure 30 du conteneur 14, de façon à former des canaux verticaux 42, d'épaisseur sensiblement uniforme ou variable, entre la chemise 28 et le conteneur 14. Ces canaux 42 constituent une sorte de cheminée qui génère une circulation de l'air, par convection naturelle, autour du conteneur 14.

Cette circulation de l'air peut être majoritairement laminaire ou turbulente selon la

puissance spécifique dissipée par le conteneur, la hauteur du conteneur et, dans une moindre mesure, le diamètre du conteneur. Le caractère turbulent de l'écoulement améliore le refroidissement du conteneur.

- 5 Il est favorisé par une puissance thermique spécifique égale ou supérieure à 1 kw/m^2 et par l'accroissement de la hauteur du conteneur et de l'épaisseur radiale des canaux verticaux 42.

- Des essais ont été conduits avec des
10 puissances thermiques spécifiques allant de 1 kw/m^2 à plus de 3 kw/m^2 et, plus particulièrement, autour de $2,5 \text{ kw/m}^2$. Les hauteurs étaient comprises entre 2 m et 5 m, la hauteur la plus grande améliorant l'efficacité du transfert thermique. Pour que la circulation dans
15 les canaux verticaux 42 ait une efficacité significative, l'épaisseur radiale doit être supérieure à 1 cm ; c'est pourquoi les essais ont été préférentiellement menés avec des épaisseurs radiales comprises entre 4 cm et 12 cm.

- 20 Pour une géométrie annulaire, le développement d'un effet cheminée en convection naturelle est régi par trois paramètres qui sont :

- la hauteur de la cheminée ; dans le cas présent, la hauteur de la cheminée est de 5 à 6 mètres
25 lorsque le conteneur est rempli de combustibles irradiés, ce qui génère un tirage très performant. Toutefois, une hauteur de 1 mètre correspondant à un conteneur rempli d'objets chauds de moindre longueur permet proportionnellement une égale efficacité ;

- 30 -la présence du conteneur cylindrique générateur du flux thermique ; le conteneur est un excellent générateur de flux thermique ; ce flux peut

être considéré comme homogène sur la paroi cylindrique ; et

-la largeur de l'espace annulaire ΔR entre le conteneur et la chemise, pour un diamètre donné ; dans
5 le cas présent, la seule largeur de l'espace annulaire 42 n'est pas suffisante pour décrire la convection dans cette géométrie ; il faut donc considérer le rapport des rayons R_1 du conteneur et R_2 de la chemise.

Le mouvement d'air est causé par la variation
10 de masse volumique du fluide soumis à un champ de forces. Le groupement qui gouverne la convection naturelle est le nombre de Grashof Gr , mais les corrélations communément admises font intervenir le nombre de Rayleigh.

15 Pour un diamètre de conteneur d'environ 2 mètres, les calculs montrent que l'effet cheminée commence à se développer dès $\Delta R = 1$ cm. L'effet croît ensuite avec ΔR pour atteindre une valeur optimale vers 5 à 6 cm (la définition de cette valeur optimale
20 s'appuie ici sur une utilisation maximale d'un évaporateur de caloduc de rendement élevé, couplé à un système performant de refroidissement par convection naturelle). Cette valeur optimale correspond à une valeur d'extraction par convection naturelle d'environ
25 40 % de la puissance totale extraite (conduction + rayonnement + convection naturelle dans les canaux 42 + convection naturelle externe). Avec $\Delta R = 4$ cm, le pourcentage de puissance extraite par l'effet de type cheminée est d'environ 25 à 30 % du total. Cette valeur
30 a été validée expérimentalement sur une maquette de 2 m de diamètre, 1,5 m de hauteur et un flux thermique de

2,5 kW/m². La valeur $\Delta R = 4$ cm correspond à l'encombrement extérieur d'un tube carré de 40 mm X 40 mm dont la section interne est nécessaire pour un fonctionnement stable en mode siphon diphasique (mode passif).

Au-delà de $\Delta R = 6$ à 7 cm environ, l'effet de type cheminée ne croît plus et il tend de manière décroissante vers une convection naturelle en espace libre pour $\Delta R > 10$ cm.

Ces valeurs se justifient dans une situation couplée d'extraction de puissance à la fois par le caloduc (pour profiter au mieux de l'extraction par conduction) et par la convection naturelle en cheminée.

Le gain de performance du système objet de l'invention est, à l'optimum, d'environ 20%. Cela se traduit, à puissance générée égale dans le conteneur, par un abaissement significatif de la température de peau du conteneur d'environ 10 à 20°C (selon la nature des différents matériaux) et pour des flux thermiques de 2 à 3 kW/m². Cet apport est donc très important.

Comme on l'a représenté schématiquement sur la figure 2, le contact entre l'évaporateur 22 et le conteneur 14 peut être limité à des zones quasi linéaires correspondant aux génératrices du conteneur 14 situées au droit de chacun des tubes 32.

Afin d'améliorer encore l'échange thermique, la surface intérieure de l'évaporateur 22 peut également comporter, au droit de chacun des tubes 32, une partie 44, de largeur limitée, dont la forme est complémentaire de celle de la surface extérieure 30 du conteneur 14, comme l'illustre la figure 3. La mise en

œuvre des moyens de serrage 40 (figure 4) a alors pour effet de maintenir ces parties 44 en contact surfacique étroit avec la surface extérieure 30 du conteneur 14.

Le contact quasi ponctuel de la figure 2 comme
5 le contact surfacique de la figure 3 peuvent être obtenus en donnant à la surface intérieure de l'évaporateur 22, entre les tubes 32, un rayon de courbure supérieur à celui de la surface extérieure 30 du conteneur 14. Ainsi, à titre d'exemple non
10 limitatif, dans le cas d'un conteneur présentant un rayon de 1000 mm, les parties de l'évaporateur 22 situées entre les tubes 32 peuvent présenter un rayon d'environ 1200 mm. Le jeu maximal entre l'évaporateur et le conteneur est alors, par exemple, de 0,85 mm.
15 Dans le cas d'un contact quasi ponctuel tel qu'illustré sur la figure 2, on obtient un jeu moyen d'environ 0,45 mm à l'intérieur des canaux 42.

Dans un premier mode de réalisation de l'invention illustré sur la figure 4, la chemise 28 est
20 matérialisée par une structure continue, de section sensiblement circulaire et de faible épaisseur, qui entoure à distance le conteneur 14. Cette structure est constituée, par exemple, par une tôle. Les tubes 32 sont alors fixés à l'intérieur de la chemise 28 par
25 tout moyen approprié. Avantageusement, cette fixation est assurée par des points de soudage.

On a également représenté sur la figure 4 un exemple de réalisation possible des moyens de serrage 40.

30 Comme l'illustre la figure 4, l'évaporateur 22 est ouvert selon une génératrice et comporte deux bords en vis-à-vis 22a, orientés parallèlement à l'axe du

conteneur 14. Les moyens de serrage 40 sont interposés entre les deux bords 22a. Plus précisément, les moyens de serrage 40 comprennent une pluralité de boulons 46, qui traversent des trous formés dans des pièces 48, 5 rapportées le long des bords 22a de l'évaporateur, sur sa surface tournée vers l'extérieur. Un ressort hélicoïdal de compression 50 est monté sur chacun des boulons 46, de façon à maintenir la force de serrage sensiblement constante dans l'hypothèse d'éventuelles 10 dilatations différentielles entre le conteneur 14 et l'évaporateur 22.

Sur la figure 5, on a représenté simultanément différentes variantes du premier mode de réalisation décrit en référence à la figure 4. Dans la pratique, on 15 comprendra que ces variantes sont des solutions alternatives, généralement mises en œuvre séparément les unes des autres, sauf indications contraires.

Les différentes variantes illustrées sur la figure 5 concernent tout d'abord la forme des tubes 32. 20 Ainsi, ces tubes peuvent présenter indifféremment une section circulaire, carrée ou rectangulaire, c'est-à-dire aplatie dans le sens de leur épaisseur. L'évacuation thermique est d'autant plus efficace que la surface de contact entre le conteneur et les parties 25 de l'évaporateur situées en face des tubes est grande, c'est-à-dire en allant des tubes de section circulaire aux tubes de section rectangulaire. Toutefois, l'étendue de cette surface de contact doit rester suffisamment faible pour qu'un contact étroit puisse 30 être obtenu sans difficulté.

A titre d'illustration nullement limitative, les tubes 32 peuvent être disposés tous les

200 mm et avoir une section de 40x40 mm ou de 60x60 mm, dans le cas de tubes carrés.

Comme on l'a représenté sur la partie droite de la figure 5, l'échange thermique entre les tubes 32 et l'air qui circule dans les espaces annulaires 42 peut être amélioré en équipant les tubes d'ailettes de refroidissement 32a, situées entre la chemise 28 et le conteneur 14. Ces ailettes 32a peuvent être rapportées sur des tubes 32 de section quelconque ou réalisées d'un seul tenant avec lesdits tubes, sous la forme de profilés extrudés.

Comme le montre la figure 6, dans le cas où des tubes de section circulaire sont utilisés, l'échange thermique peut être amélioré en équipant chacun des tubes 32 de talons 52, du côté du conteneur 14. La face intérieure des talons 52 est alors maintenue en appui surfacique étroit contre la surface extérieure 30 du conteneur 14.

Sur la figure 7, on a représenté différentes variantes de réalisation possibles d'un évaporateur conforme à un deuxième mode de réalisation de l'invention.

Dans ce deuxième mode de réalisation, la chemise 28 et les tubes 32 sont réalisés d'un seul tenant. Plus précisément, chacun des tubes 32 est réalisé d'un seul tenant avec deux tronçons 28a de la chemise 28. Chacun des tronçons 28a présente, en section selon un plan horizontal, la forme d'un arc de cercle dont la longueur est égale à la moitié de la longueur de la chemise 28 entre deux tubes 32 consécutifs. Les tronçons 28a des tubes 32 voisins sont

assemblés entre eux bord à bord, selon des génératrices du conteneur 14, pour former la chemise 28.

L'assemblage bord à bord des tronçons 28a peut être assuré soit par des soudures 54, soit par des
5 moyens de liaison mécanique 56, tels que des moyens d'éclissage ou autres, comme on l'a illustré sur la figure 7.

Lorsque les tubes 32 présentent une section circulaire, ils peuvent comporter des talons 52, comme
10 on l'a décrit précédemment en référence à la figure 6, dans le cadre du premier mode de réalisation de l'invention. Les talons 52 comportent alors une face intérieure dont la forme est complémentaire de celle de la surface cylindrique extérieure du conteneur 14. Dans
15 ce cas, les moyens de serrage associés à l'évaporateur maintiennent la face intérieure de chacun des talons 52 en appui surfacique étroit, c'est-à-dire sans jeu, contre la surface extérieure du conteneur 14.

Comme on l'a également représenté sur la
20 figure 7, chacune des pièces d'un seul tenant comprenant un tube 32 et deux tronçons de chemise 28a peut comprendre de plus une ou plusieurs ailettes de refroidissement 58, sur sa surface tournée vers l'extérieur, c'est-à-dire à l'opposé du conteneur 14.
25 Dans le premier mode de réalisation de l'invention illustré sur les figures 4 à 6, de telles ailettes de refroidissement 58 (figure 5) peuvent également être prévues. Dans ce cas, les ailettes 58 sont rapportées par soudage sur la surface extérieure de la tôle
30 formant la chemise 28.

Dans le deuxième mode de réalisation de l'invention, les moyens de serrage peuvent être

semblables à ceux qui sont utilisés dans le premier mode de réalisation, tels que décrits précédemment en référence à la figure 4.

Une modélisation en éléments finis faite par le demandeur a montré, de manière surprenante, qu'un évaporateur 22 présentant un contact surfacique limité avec le conteneur 14 (correspondant à un jeu de 0,01 mm), au droit des tubes 32 du caloduc, conformément à l'invention, permet d'obtenir des propriétés thermiques sensiblement identiques à celles qui sont obtenues en utilisant un évaporateur conforme à la technique antérieure décrite dans le document FR-A-2 791 805, dans lequel un jeu uniforme de 0,1 mm est obtenu sur toute l'interface entre l'évaporateur et le conteneur. Ce résultat est particulièrement avantageux d'un point de vue industriel puisqu'il est beaucoup plus facile d'assurer un contact local limité au droit des tubes 32 que d'obtenir un jeu uniforme de 0,1 mm sur toute la surface de l'évaporateur 22.

Ces résultats sont illustrés sur la figure 8, qui représente un repère orthonormé sur lequel on a porté en abscisses le jeu moyen (en mm) entre l'évaporateur 22 et le conteneur 14 et en ordonnées la température moyenne (en °C) dans l'épaisseur du conteneur 14. Plus précisément, la courbe A correspond au cas d'un évaporateur de l'art antérieur, dans lequel un jeu constant est prévu entre l'évaporateur et le conteneur, la courbe B correspond au cas d'un évaporateur qui serait localement en contact avec le conteneur uniquement entre les tubes et la courbe C correspond au cas d'un évaporateur 22 conforme à

l'invention, c'est-à-dire localement en contact avec le conteneur 14 uniquement en face des tubes 32.

Comme l'illustre également le Tableau 1 ci-dessous, on voit que l'efficacité du caloduc dépend essentiellement du jeu sous les tubes 32 et peu du jeu moyen entre l'évaporateur 22 et le conteneur 14. Par exemple, si l'on fixe la température maximale du conteneur à 155°C, on voit sur le Tableau 1 que ce résultat peut être obtenu avec un jeu moyen de 0,5 mm et un contact en face des tubes 14 conformément à l'invention. Ce résultat est comparable à celui qui est obtenu dans le cas d'un jeu uniforme de 0,1 mm selon l'art antérieur, très difficile à obtenir.

15

Tableau 1

Jeu moyen (en mm)	Température moyenne à l'intérieur du conteneur (en °C)		
	Jeu uniforme	Contact en face des tubes	Contact entre les tubes
0,01	138		
0,05		140	150
0,1	153		
0,3	175	149	186
0,5	193	155	203
1	224		
3	283		

La présence d'un jeu moyen de 0,5 mm avec un contact entre l'évaporateur 22 et le conteneur 14 en face des tubes 32, conformément à l'invention, signifie que le jeu est nul au droit des tubes 32 (c'est-à-dire

20

égal à 0,01 mm dans la modélisation) et qu'il évolue linéairement jusqu'à 1 mm au milieu de l'arc de cercle formé en section par l'évaporateur entre deux tubes 32 voisins. Un tel agencement est parfaitement réalisable
5 avec des moyens industriels traditionnels. En effet, il permet, à rendement thermique égal, de multiplier par cinq le jeu moyen à la condition que les zones de contact soient localisées en face des tubes 32.

Comme on l'a décrit en référence aux
10 figures 2 et 3, les zones de contact peuvent être quasi linéaires ou, de préférence, avoir la forme de surfaces étroites s'étendant sur toute la hauteur du conteneur.

Sur la figure 9, on a représenté l'évolution du flux thermique (en W/m^2) en fonction de
15 la distance à l'axe d'un tube 32 (en mm), sur l'arc de cercle formé en section par l'évaporateur 22. Plus précisément, cette évolution a été représentée en D dans le cas d'un jeu constant de 0,01 mm entre l'évaporateur 22 et le conteneur 14, en E dans le cas
20 d'un jeu constant de 0,3 mm et en F dans le cas d'un contact linéaire en face des tubes 32 et d'un jeu moyen de 0,3 mm.

On voit sur la figure 9 que la répartition du flux thermique dépend fortement de la nature du jeu
25 entre l'évaporateur et le conteneur. En particulier, on observe que la majeure partie du flux thermique est transmise dans les zones proches des tubes 32 et que ce phénomène s'accroît lorsque le jeu sous les tubes diminue. Ainsi, dans le cas d'un jeu constant de 0,3
30 mm, la moitié du flux thermique est transmise dans les 31 mm en partant des tubes (courbe E), alors que cette distance se réduit à 18 mm dans le cas d'un jeu

constant de 0,01 mm (courbe D) et à 17 mm dans le cas d'un contact linéaire sous les tubes avec un jeu moyen de 0,3 mm (courbe F). Les résultats illustrés sur la figure 9 confirment donc l'intérêt présenté par le fait
5 de privilégier les contacts au droit des tubes 32, conformément à l'invention. Ces résultats ont été confirmés expérimentalement grâce à une maquette d'essais thermiques.

En remplaçant les contacts linéaires sous
10 les tubes 32 par des contacts surfaciques, on accentue ce phénomène. Par conséquent, ce n'est plus la moitié mais la totalité du flux thermique qui est alors transmise sous les tubes 32.

L'influence des efforts de serrage exercés
15 sur l'évaporateur 22 par les moyens de serrage 40 a également été étudiée. Les résultats de cette étude sont portés sur la figure 10. Cette figure représente l'évolution de la température maximale du conteneur (en°C) en fonction de l'effort de serrage (en Newtons).
20 On voit que la température diminue lorsque l'effort de serrage augmente de 0 à 4000 N, mais qu'au-delà de 4000 N, toute augmentation de l'effort est sans effet. Des moyens de serrage 40 tels que ceux qui ont été décrits en référence à la figure 4 permettent
25 d'atteindre la valeur de 4000 N sans difficulté particulière.

Un évaporateur 22 conforme à l'invention, réalisé en combinant le principe du contact quasi linéaire de la figure 2 avec le deuxième mode de
30 réalisation décrit en référence à la figure 7 (tronçons de chemise 28a et tubes 32 d'un seul tenant), a d'abord été testé, avec les valeurs numériques indiquées

précédemment en référence à la figure 2 (conteneur de 1000 mm de rayon, évaporateur de rayon de courbure égal à 1200 mm, jeu maximal de 0,85 mm, contact quasi linéaire sous les tubes). L'expérience a confirmé que
5 cet évaporateur était thermiquement équivalent à un évaporateur de l'art antérieur, présentant un jeu moyen de 0,01 mm avec le conteneur, très difficile à obtenir dans la pratique.

Dans un deuxième temps, on a réalisé un
10 évaporateur 22 combinant les caractéristiques de la figure 3 (contact surfacique) et du deuxième mode de réalisation de l'invention. Dans ce cas, la surface de contact au droit des tubes 32 ne doit pas être trop large, sous peine de retomber sur les difficultés de
15 mise en œuvre caractéristiques de l'art antérieur. Ainsi, il apparaît que, pour un conteneur 14 de 2000 mm de diamètre, des zones de contact de 40 à 60 mm de large constituent un bon compromis entre l'obtention d'un rendement thermique fortement augmenté et une
20 réalisation aisée.

Puisque la plus grande partie de la chemise 28 ne participe que très partiellement au passage du flux thermique, le premier mode de réalisation décrit précédemment en référence aux figures 4 à 6 a constitué
25 une troisième étape d'expérimentation. En effet, ce mode de réalisation permet, pour un coût réduit, de conserver un rendement thermique acceptable. En plaçant la chemise 28 à une distance du conteneur 14 égale à l'encombrement extérieur du tube 32, on fait
30 disparaître toutes les tolérances de fabrication. La chemise 28 forme une structure circulaire continue qui

permet de ceinturer les tubes 32 et de les plaquer sur le conteneur 14.

De plus, un espace annulaire, en forme de couronne, est créé entre la chemise et le conteneur.

5 Cet espace correspond aux canaux 42 sur la figure 2. Il favorise le développement d'une sorte d'effet cheminée, qui permet à l'air ambiant ainsi canalisé de circuler verticalement sous l'effet d'une convection naturelle dont le moteur est la puissance thermique du conteneur

10 14. On crée ainsi un refroidissement passif indépendant très efficace, puisqu'il est effectué au contact direct du conteneur, c'est-à-dire sans aucune résistance de contact. L'effet de ce refroidissement s'ajoute à celui du caloduc en contact avec le conteneur. Le rendement

15 total de ce mode de réalisation est donc supérieur à celui de l'art antérieur, pour un coût très inférieur.

On peut considérer que la convection naturelle de l'air à l'extérieur de la chemise 28 n'est pas significativement affectée et que ce phénomène

20 s'ajoute aux deux phénomènes précédents.

De telles turbulences dans les canaux verticaux 42 sont si efficaces qu'elles peuvent diminuer le flux thermique que doit évacuer le circuit fluide. Cette diminution est avantageuse dans deux

25 cas : d'une part, si une défaillance accidentelle affecte le circuit fluide, le délai disponible pour effectuer une intervention se trouve fortement allongé ; d'autre part, sur le long terme, la date à laquelle on peut cesser d'utiliser ce circuit fluide

30 compte tenu de la décroissance du flux thermique est significativement anticipée.

Une variante de réalisation de l'invention consiste à extraire en circuit fermé l'air circulant dans les canaux verticaux 42, à l'aide de moyens connus de l'homme du métier. Cette variante présente en outre
5 l'avantage de réaliser une barrière étanche de confinement supplémentaire, augmentant la sécurité dans une éventuelle situation d'accident, et d'éviter d'affecter thermiquement l'air de l'entrepôt.

Il est à noter, de surcroît, que la chemise
10 28 sert aussi d'écran vis-à-vis des structures de béton du site et que sa température est inférieure à celle de la chemise utilisée dans l'art antérieur puisqu'elle est refroidie sur ses deux faces et n'est pas en continuité thermique avec les tubes 32.

Enfin, on observe également que, du fait
15 des performances élevées de l'installation conforme à l'invention, la conductivité thermique des matériaux en présence ne participe que très peu au rendement thermique. Le concepteur dispose donc d'un choix de
20 matériaux beaucoup plus large que dans l'art antérieur.

REVENDICATIONS

1. Installation d'entreposage de très longue
5 durée de produits calorifiques, comportant au moins un
conteneur (14) de confinement desdits produits, un
évaporateur (22) comprenant une chemise (28) entourant
le conteneur (14) et une pluralité de tubes (32)
solidaires de la chemise (28) et remplis d'un fluide
10 caloporteur, et des moyens de serrage (40) de
l'évaporateur (22) sur le conteneur (14), caractérisé
en ce que l'évaporateur (22) présente une surface
intérieure telle que les moyens de serrage (40)
maintiennent l'évaporateur (22) en contact étroit avec
15 une surface extérieure (30) du conteneur (14) seulement
en face de chacun des tubes (32).

2. Installation selon la revendication 1, dans
laquelle la surface intérieure de l'évaporateur (22)
20 présente, entre les tubes (32), un rayon de courbure
sensiblement supérieur à celui de la surface extérieure
(30) du conteneur (14).

3. Installation selon l'une quelconque des
25 revendications 1 et 2, dans laquelle la surface
intérieure de l'évaporateur (22) comporte, en face de
chacun des tubes (32), une partie (44) de forme
complémentaire de la surface extérieure (30) du
conteneur (14), maintenue en contact surfacique étroit
30 avec ladite surface extérieure par les moyens de
serrage (40).

4. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle les tubes (32) sont fixés à l'intérieur d'une structure continue, de section sensiblement circulaire, formant la chemise (28).

5. Installation selon la revendication 4, dans laquelle les tubes (32) sont fixés à l'intérieur de la chemise (28) par soudage.

10

6. Installation selon la revendication 4, dans laquelle les tubes (32) comportent des ailettes de refroidissement (32a) situées entre la chemise (28) et le conteneur (14).

15

7. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, dans laquelle chaque tube (32) est réalisé d'un seul tenant avec deux tronçons de chemise (28a) et les tronçons de chemise (28a) solidaires de tubes (32) voisins sont assemblés entre eux bord à bord pour former la chemise (28).

8. Installation selon la revendication 7, dans laquelle les tronçons de chemise (28a) solidaires de tubes (32) voisins sont assemblés entre eux par des soudures (54).

9. Installation selon l'une quelconque des revendications 7 et 8, dans laquelle les tronçons de chemise (28a) solidaires de tubes (32) voisins sont assemblés entre eux par des moyens de liaison mécaniques (56).

10. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle les tubes (32) ont une section sensiblement carrée ou rectangulaire.

5 11. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 9, dans laquelle les tubes (32) ont une section sensiblement circulaire.

10 12. Installation selon la revendication 10, dans laquelle les tubes (32) présentent des talons (52) dont une face intérieure est maintenue en appui surfacique étroit contre la surface extérieure (30) du conteneur (14) par les moyens de serrage (40).

15 13. Installation selon l'une quelconque des revendications 1 à 12, dans laquelle une surface extérieure de l'évaporateur (22) comporte des ailettes de refroidissement (58)

20 14. Installation selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans laquelle, en dehors de zones situées en face des tubes (32), l'évaporateur (22) est éloigné du conteneur (14) de façon à délimiter des canaux verticaux (42) de circulation d'air, par
25 convection naturelle.

15. Installation selon la revendication 14, dans laquelle les canaux (42) font partie d'un circuit fermé constituant un confinement.

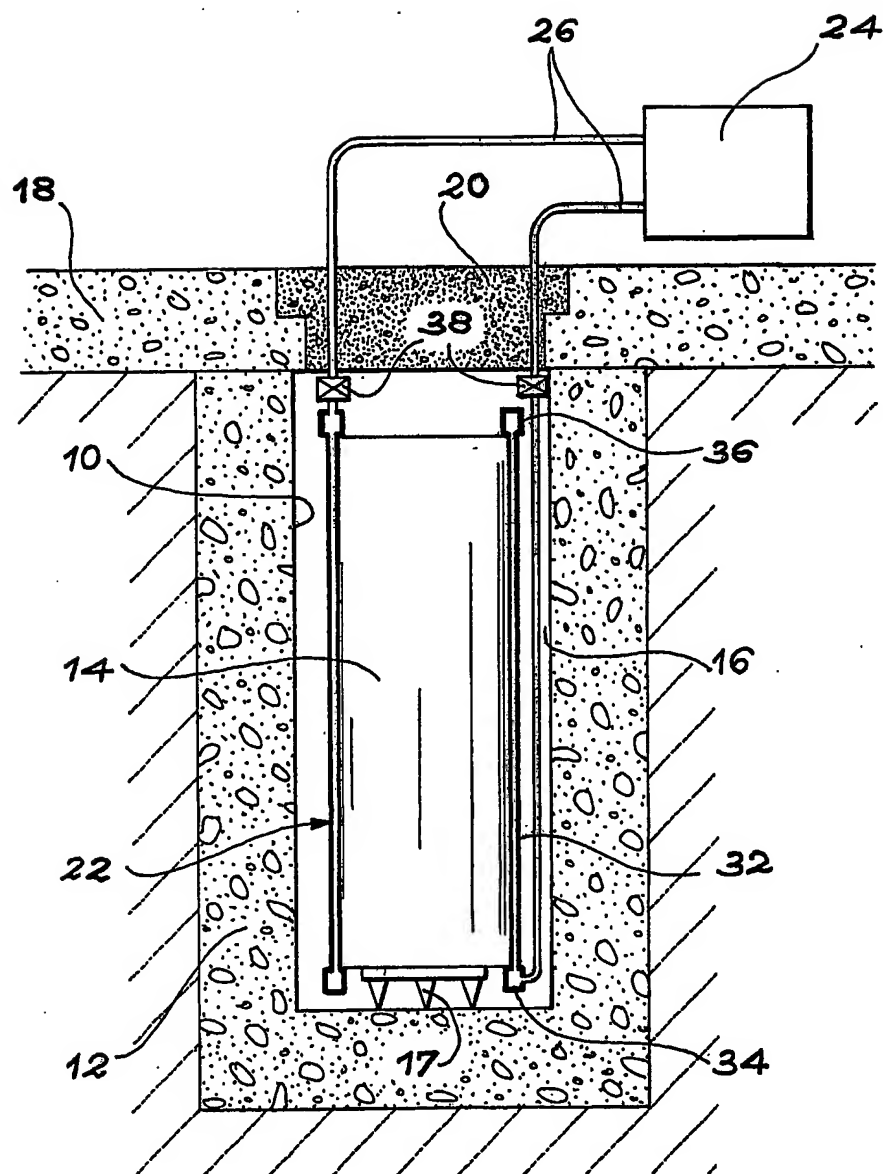


FIG. 1

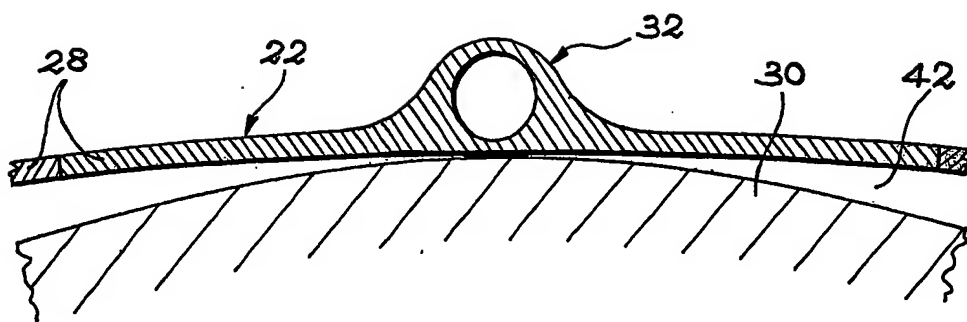


FIG. 2

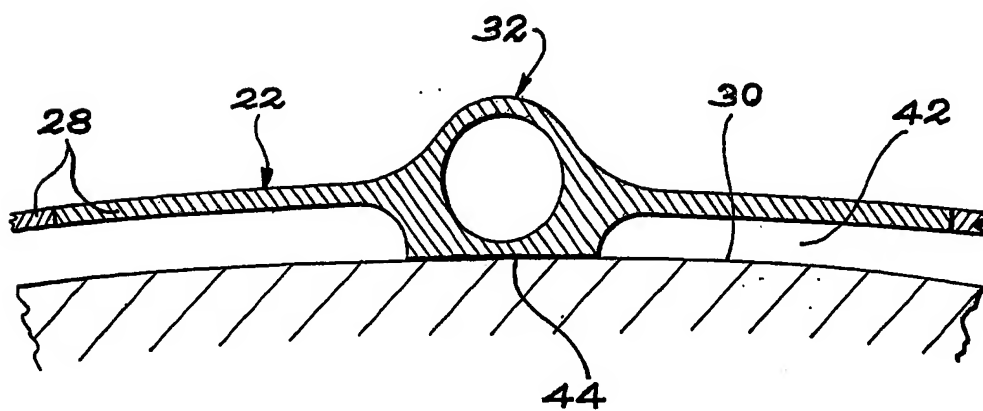


FIG. 3

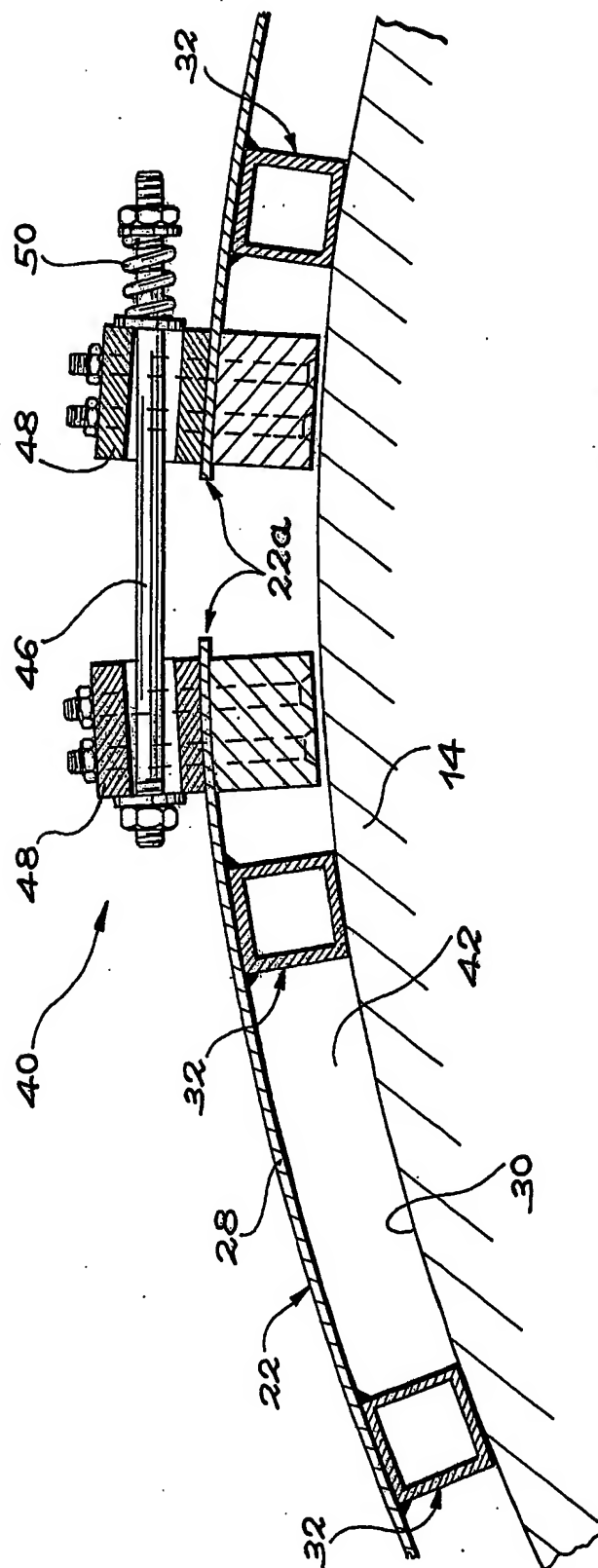


FIG 4

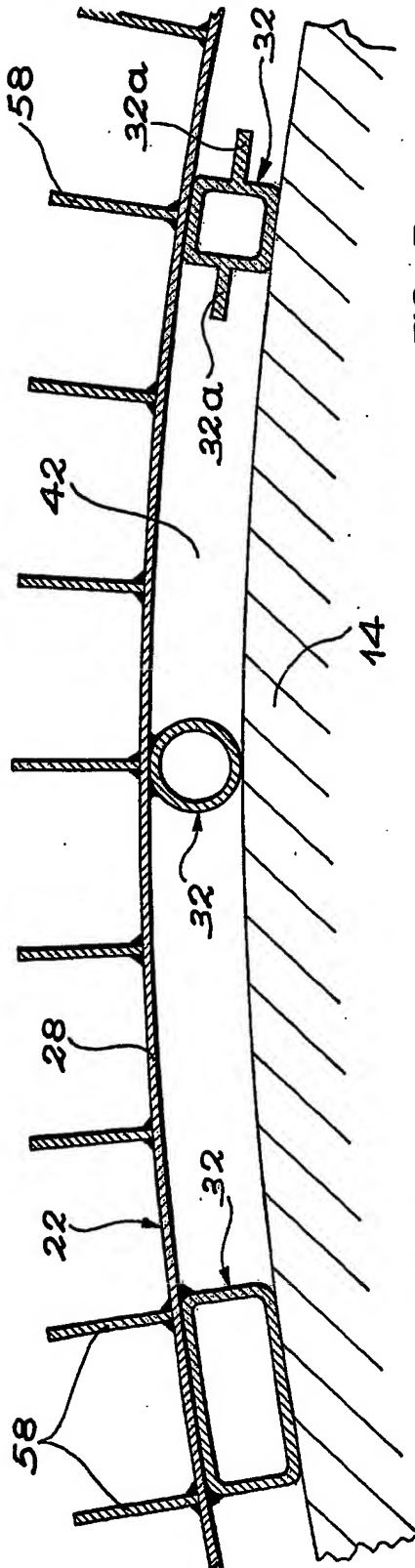


FIG. 5

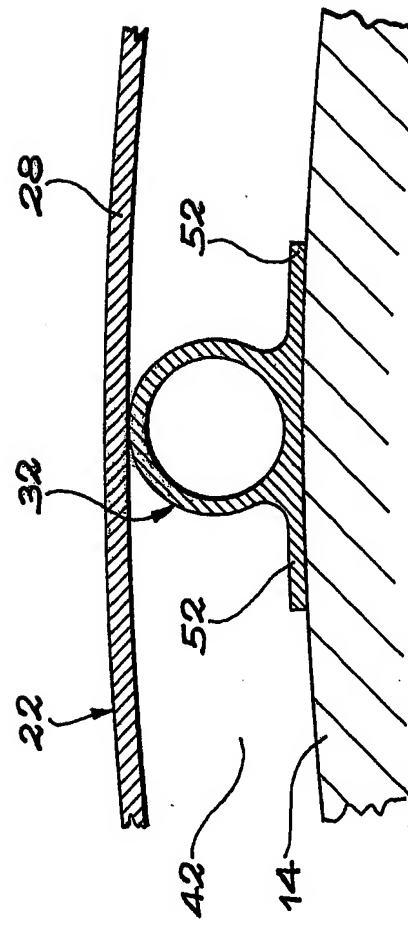


FIG. 6

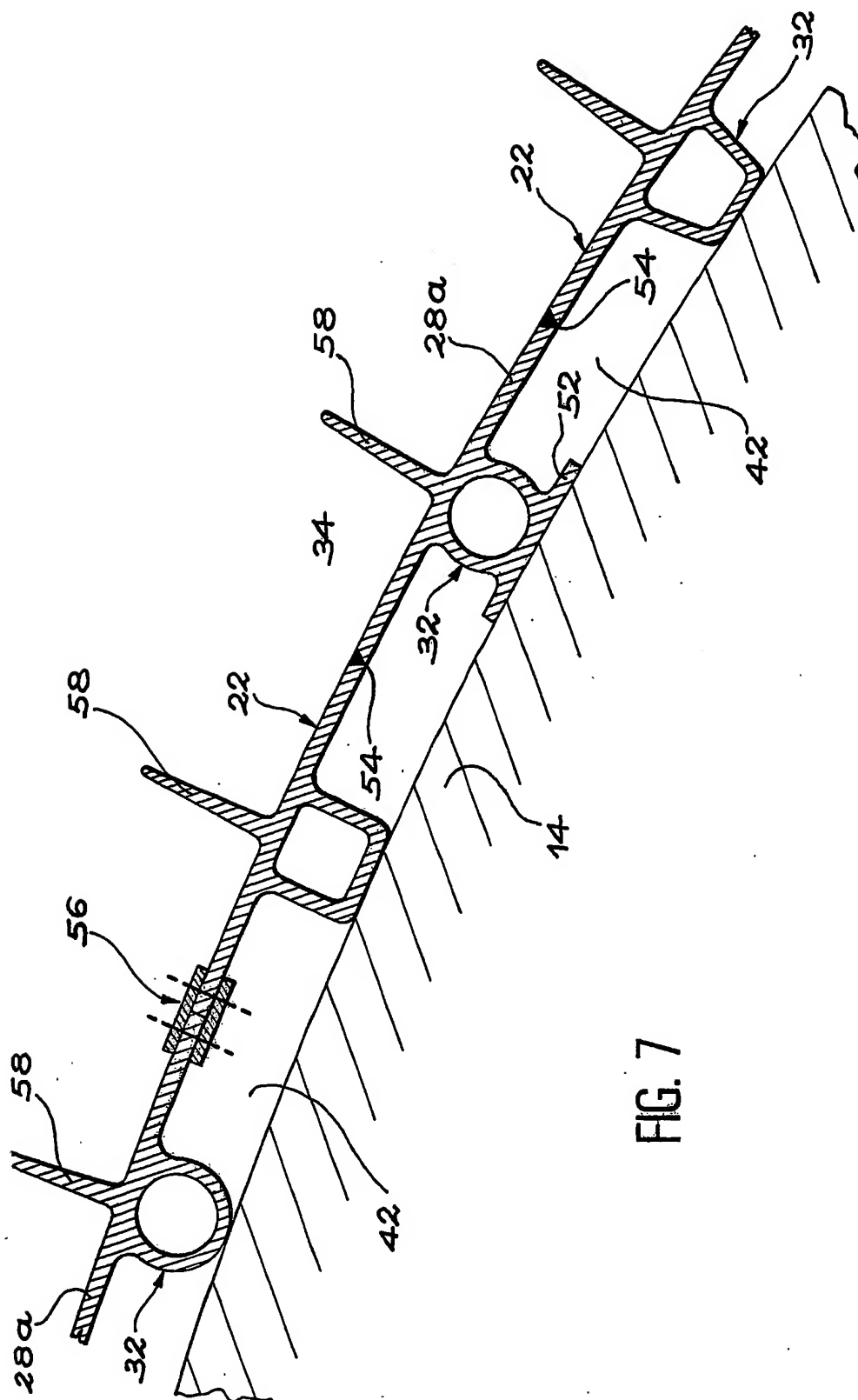


FIG. 7

